

文章编号:1672-6561(2012)02-0015-09

双层滑脱构造的物理模拟:对准噶尔盆地 南缘褶皱-冲断带的启示

于福生¹, 李定华¹, 赵进雍¹, 董长华²

(1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油天然气集团公司东方地球物理勘探有限责任公司 综合物化探处, 河北 涿州 072751)

摘 要:为了研究双层滑脱构造变形的主控因素, 设计了 3 类砂箱模型, 对滑脱层材料、滑脱层厚度、滑脱层黏度、上覆砂层厚度、受力边界条件等主控因素进行物理模拟试验研究。试验结果表明: 不同滑脱层材料产生的变形样式不同。以微玻璃珠组成的滑脱层主要产生前展型逆冲叠瓦式断裂构造, 下部滑脱层起主控滑脱作用, 上部滑脱层厚度、滑脱层之上砂层厚度越大越容易形成滑脱断层; 挤压方向与受力边界间的夹角较大时, 上部滑脱层容易先形成滑脱断层, 其推覆体前缘水平位移较快。以不同黏度硅胶组成的滑脱层产生不同的分层滑脱构造变形样式, 当下部滑脱层硅胶黏度为 500~1 000 Pa·s 时, 形成分层滑脱前展型叠瓦式构造; 当硅胶黏度为 2 000~2 500 Pa·s 时, 靠近挤压端先形成背冲构造, 然后在上部滑脱层形成叠瓦式构造, 在下部滑脱层形成对冲三角带构造、冲起背斜构造。地震和钻井资料显示, 准噶尔盆地南缘西段霍尔果斯—安集海褶皱—冲断带具有双层滑脱变形特征; 模拟结果认为, 斜向受力边界、侏罗纪煤层以及古近纪泥岩层的分层滑脱作用是控制变形过程的主要因素。

关键词: 双层滑脱构造; 褶皱—冲断带; 变形特征; 主控因素; 物理模拟; 砂箱模型; 霍尔果斯—安集海; 准噶尔盆地

中图分类号: P542

文献标志码: A

Physical Simulation of Double Decollements: Insights into the Fold-and-thrust Belt in the Southern Front of Junggar Basin

YU Fu-sheng¹, LI Ding-hua¹, ZHAO Jin-yong¹, DONG Chang-hua²

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Section of Comprehensive Geophysical and Geochemical Exploration, Bureau of Geophysical Prospecting Co., Ltd., China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072751, Hebei, China)

Abstract: In order to study the main controlling factors of deformation generated by double decollements, three sets of sand-box models were devised to physically simulate the main controlling factors including the material for double decollements, thickness and viscosity of double decollements, thickness of overlying sand and stress boundary condition. The test results showed that different materials for double decollements produced different sets of structure styles. Imbricate wedges thrusting forward were developed and governed by the lower decollement made up of micro glass beads, the more thickness of upper decollement and overlying sand above the decollement consisted of micro glass beads were, the easier detachment fault

收稿日期: 2011-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972091)

作者简介: 于福生(1969-), 男, 黑龙江望奎人, 副教授, 工学博士, E-mail: fushengyu@cup.edu.cn.

developed, and the larger included angle between compression direction and stress boundary was, the easier to generate detachment fault along upper decollement with faster horizontal migration of thrust wedge. Different structure deformation patterns with lamination formed above viscous decollements consisted of silicon gels with different viscosities, and when the viscosities of silicon gels for lower decollement were 500–1 000 Pa · s, imbricate wedges thrusting forward with lamination developed, and when the viscosities of silicon gels were 2 000–2 500 Pa · s, pop-up structure nearby the compression end developed first, then imbricate structure formed within upper decollement, and trigonometric belt, pop-up structure and basement involved anticline developed within lower decollement. Seismic profile and drilling data indicated that fold-and-thrust belts in Khorgos-Anjihai in the western part of southern front of Junggar Basin had the lamination deformation characteristics generated by double decollements, and the simulation results illustrated that the lamination decollement of oblique stress boundary, coal layer in Jurassic and mudstone bed in Paleogene were the main controlling factors on deformation.

Key words: double decollements; fold-and-thrust belt; deformation characteristic; main controlling factor; physical simulation; sand-box model; Khorgos-Anjihai; Junggar Basin

0 引言

褶皱-冲断构造是造山带前缘发育的重要构造变形样式,其演化过程受地层组合特征、岩石力学性质、受力边界条件等诸多因素影响^[1-10]。大量研究资料表明,滑脱层的存在对褶皱-冲断带的几何学、运动学特征具有重要的控制作用^[11-16]。前人研究主要集中在单层滑脱作用如何影响褶皱、断层的几何学、运动学特征^[17-22]。最近,有研究者开始利用构造物理模拟方法探讨双层滑脱作用对构造变形的影响^[23-27],但只是研究单一因素对变形过程的影响^[27],缺乏多因素综合分析的模拟研究成果及其应用实例。笔者借鉴滑脱层材料属性、滑脱层黏度、上覆砂层厚度、受力边界条件等因素对双层滑脱褶皱-

冲断构造演化过程影响的基础试验结果,设计试验模型来研究准噶尔盆地南缘西段霍尔果斯-安集海背斜带形成的主控因素。

准噶尔盆地南缘西段发育有 3 排褶皱-冲断带^[4,28](图 1),位于第 2 排的霍尔果斯背斜带和第 3 排的安集海背斜带具有典型的滑脱变形特征,但由于地震反射剖面质量较差导致其存在不同的认识。邓起东等认为霍尔果斯背斜带属于双层滑脱变形,安集海背斜带属于单层滑脱变形^[4,29-32]。于福生等认为霍尔果斯背斜带、安集海背斜带都为双层滑脱变形^[22]。为了验证两种解释方案的合理性及其成因机制,依据基础试验结果和地层组合特征,设计了斜向挤压双层黏性滑脱模型进行模拟研究。

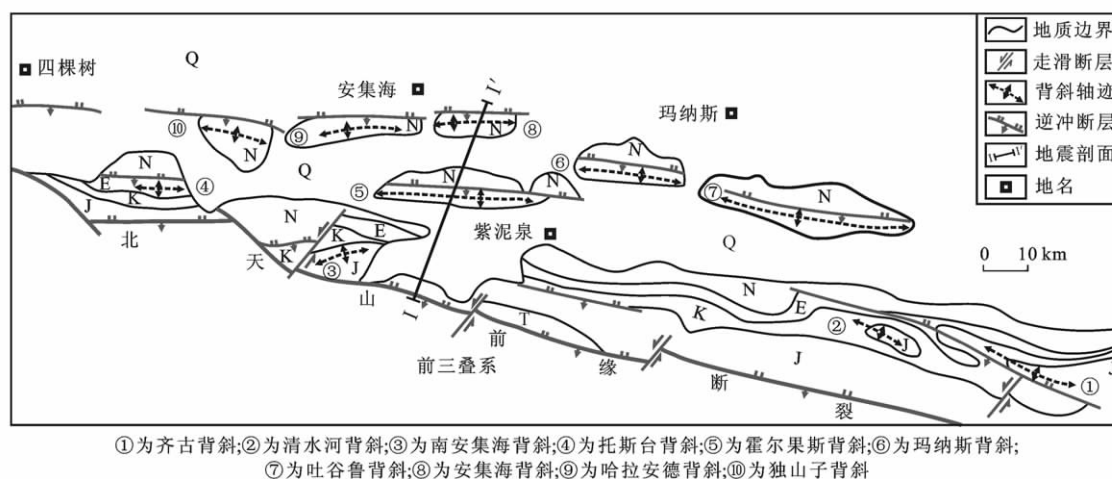


图 1 准噶尔盆地南缘西段构造纲要

Fig. 1 Structural Map of the Western Part in the Southern Front of Junggar Basin

1 试验设置

1.1 试验材料

前人大量试验和测试结果证明,松散干燥的石英砂内摩擦角 $\varphi \approx 37^\circ$,符合库伦-莫尔破裂准则,适合模拟强度较大的能干岩层,如砾岩、砂岩、灰岩^[33-34];微玻璃珠 $\varphi \approx 25^\circ$,适合模拟强度较小的非能干岩层,如泥岩层、煤层、蒸发岩等滑脱层^[12,23,26,35];无色透明的硅胶遵循牛顿黏度定律,其黏度可以调节,是模拟膏

盐层的理想材料^[11,19,27,36-37]。笔者在研究滑脱层厚度及其上覆砂层厚度变化等因素试验模型中选择微玻璃珠作为滑脱层材料;在研究滑脱层强度变化试验模型中选择硅胶作为滑脱层材料,其黏度为 $(0.05 \sim 5) \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。所有试验都选择松散干燥的石英砂作为非滑脱层材料。

1.2 模型设置

根据研究目的不同,建立了 3 类试验模型,共完成 14 组模拟试验,主要参数见表 1。

表 1 不同模型试验参数

Tab. 1 Test Parameters of Different Models

模型类型	试验编号	下部滑脱层材料类型及其厚度	上部滑脱层材料类型及其厚度	中间砂层厚度/mm	上部砂层厚度/mm	挤压方向与受力边界间夹角/(°)	挤压速度/(cm·s ⁻¹)
Ⅰ类模型	MDL1	6 mm 微玻璃珠	9 mm 微玻璃珠	15	15	90	0.025
	MDL2	6 mm 微玻璃珠	3 mm 微玻璃珠	15	15	90	0.025
	MDL3	10 mm 微玻璃珠	8 mm 微玻璃珠	15	15	90	0.025
	MDL4	4 mm 微玻璃珠	8 mm 微玻璃珠	15	15	90	0.025
	MDL5	6 mm 微玻璃珠	5 mm 微玻璃珠	15	15	90	0.025
	MDL6	6 mm 微玻璃珠	5 mm 微玻璃珠	15	6	90	0.025
	MDL7	6 mm 微玻璃珠	5 mm 微玻璃珠	6	15	90	0.025
Ⅱ类模型	MDL8	6 mm 微玻璃珠	8 mm 微玻璃珠	15	15	75	0.025
	MDL9	6 mm 微玻璃珠	8 mm 微玻璃珠	15	15	65	0.025
	MDL10	6 mm 微玻璃珠	8 mm 微玻璃珠	15	15	55	0.025
Ⅲ类模型	MDL11	10 mm 黏度为 $0.5 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 硅胶	10 mm 黏度为 $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 硅胶	8	10	90	0.025
	MDL12	10 mm 黏度为 $1.0 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 硅胶	10 mm 黏度为 $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 硅胶	8	10	90	0.025
	MDL13	10 mm 黏度为 $2.0 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 硅胶	10 mm 黏度为 $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 硅胶	8	10	90	0.025
	MDL14	10 mm 黏度为 $2.5 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 硅胶	10 mm 黏度为 $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 硅胶	8	10	90	0.025

Ⅰ类模型:用于研究滑脱层本身的厚度及其上覆砂层厚度变化对变形的影响,包括 MDL1 ~ MDL7 等 7 组试验。试验模型规格为 $80 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,上、下部滑脱层材料为不同厚度的微玻璃珠(厚度可控,易于铺设),其上铺设单层厚度为 3 mm 的松散石英砂。试验装置左侧固定,右侧挤压(图 2),挤压方向与受力边界间的夹角为 90° ,挤压速度为 $0.025 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,收缩率为 50%。

Ⅱ类模型:用于研究受力边界条件变化对变形的影响,包括 MDL8 ~ MDL10 等 3 组试验,挤压方向与受力边界间的夹角分别为 75° 、 65° 、 55° ,滑脱层

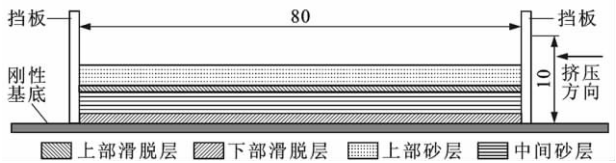


图 2 试验装置(单位:cm)

Fig. 2 Schematic Illustration(Unit:cm)

厚度、砂层厚度、挤压速度等参数见表 1。

Ⅲ类模型:用于研究下部滑脱层黏度变化对变形的影响作用,包括 MDL11 ~ MDL14 等 4 组试验。试验模型规格同Ⅰ类模型,上部滑脱层材料为黏度固定的硅胶(黏度为 $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$),下部滑脱层材料为黏度不同的硅胶,其上铺设 5 层单层厚度为 2 mm 的松散石英砂。试验装置左侧固定,右侧挤压,挤压方向与受力边界间的夹角为 90° ,挤压速度为 $0.025 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,收缩率为 50%。

2 结果分析

2.1 滑脱层厚度

以微玻璃珠为上、下部滑脱层的厚度变化试验(MDL1 ~ MDL4)模拟结果具有以下特点。

(1)下部滑脱层对变形样式起主导控制作用,变形样式主要为前展型逆冲叠瓦式断裂构造,靠近挤压端发育反冲断层。

(2) 下部滑脱层与中间砂层仅发育断裂构造, 上部滑脱层与上部砂层发育断层相关褶皱构造。

(3) 当下部滑脱层厚度不变时, 上部滑脱层厚度较大者容易形成滑脱断层, 如试验 MDL1 上部滑脱层厚度为 9 cm, 当收缩率超过 12.5% 时, 在逆断层 F_2 前侧形成一条滑脱断层 F_{21} , 当收缩率超过 25%

时, 在滑脱断层 F_{21} 的前侧形成另一条滑脱断层 F_{22} (图 3 中试验 MDL1)。而上部滑脱层厚度较小时难形成滑脱断层, 如试验 MDL2 上部滑脱层厚度为 3 cm, 在收缩率超过 50% 时, 还没有发育滑脱断层 (图 3 中试验 MDL2)。

(4) 当保持上部滑脱层厚度不变时, 下部滑脱层

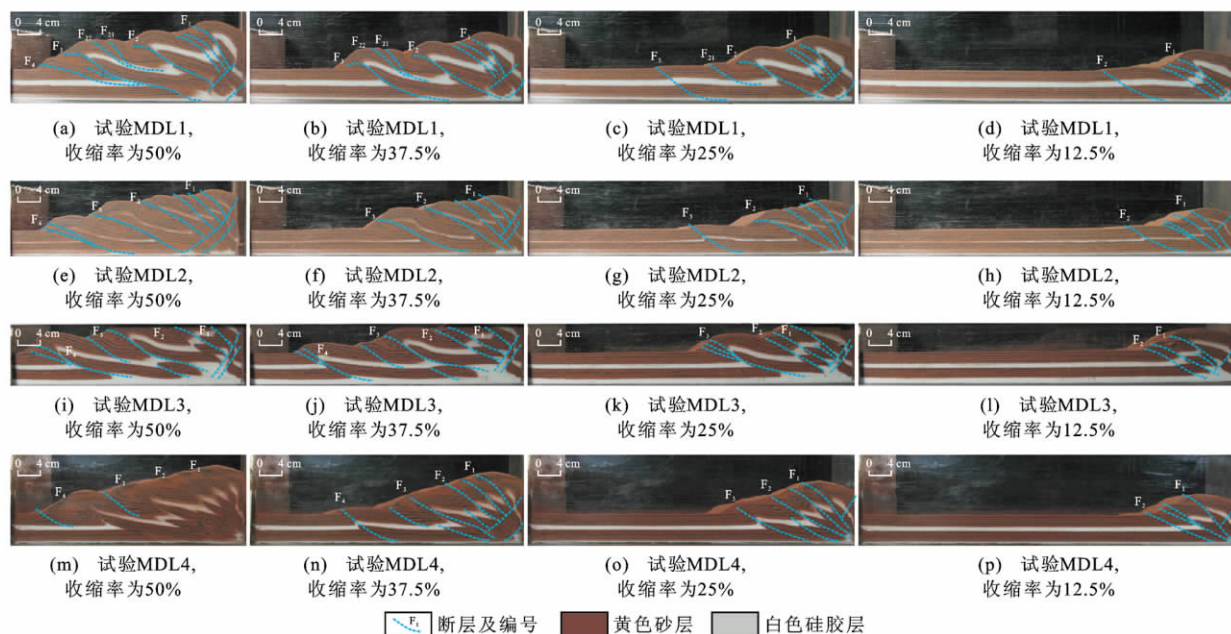


图 3 滑脱层厚度变化模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of Simulation Results About Different Thicknesses of Decollements

的厚度变化对逆冲断层叠置样式影响不大, 但对上部滑脱层与上部砂层的褶皱紧闭程度有一定影响, 下部滑脱层厚度大者形成的断弯褶皱较开阔。

(5) 当收缩率相同时, 上、下部滑脱层厚度较大者推覆体前缘位移量相对较大 (图 4)。

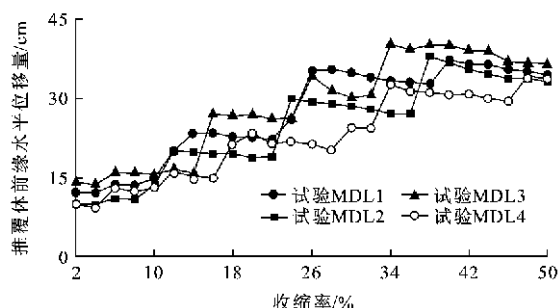


图 4 推覆体前缘水平位移量与收缩率变化关系

Fig. 4 Relationship Between Horizontal Migration of Thrust Wedge and Shrinkage Rate

2.2 上覆砂层厚度

保持上、下部滑脱层的厚度不变, 改变中间砂层与上部砂层厚度, 其试验结果差异如下。

(1) 上部砂层厚度较大, 容易先形成滑脱断层。

试验 MDL5 上部砂层厚度为 15 cm, 当收缩率超过 12.5% 时, 开始形成第 1 条滑脱断层 F_{21} (图 5 中试验 MDL5); 而 MDL6 上部砂层厚度为 6 cm, 当收缩率超过 25% 时, 才开始形成第 1 条滑脱断层 F_{41} (图 5 中试验 MDL6)。

(2) 当中间砂层厚度较薄时, 上、下部滑脱层变形一致, 上部滑脱层内不发育滑脱断层 (图 5 中试验 MDL7)。

(3) 上部砂层厚度较大时, 形成的断层相关褶皱较开阔 (图 5 中试验 MDL5); 上部砂层厚度较小时, 形成的断层相关褶皱较紧闭 (图 5 中试验 MDL6)。

2.3 受力边界条件

在滑脱层厚度、上覆砂层厚度保持不变的前提下, 改变挤压方向与受力边界间的夹角, 其模拟结果特点如下。

(1) 挤压方向与受力边界间的夹角越大, 上部滑脱层越容易先形成滑脱断层。当挤压方向与受力边界间的夹角为 75° 以及收缩率大于 13% 时, 开始形成第 1 条滑脱断层 F_3 (图 6 中试验 MDL8)。挤压方向与受力边界间的夹角为 65° 以及收缩率接近

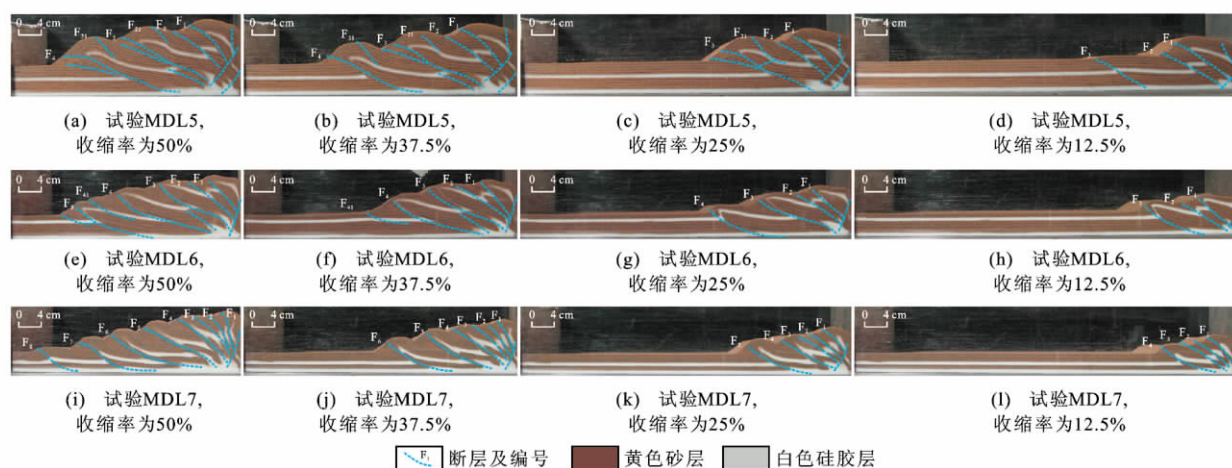


图5 滑脱层上覆砂层厚度变化模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of Simulation Results About Different Thicknesses of Sand Beds Above Decollements

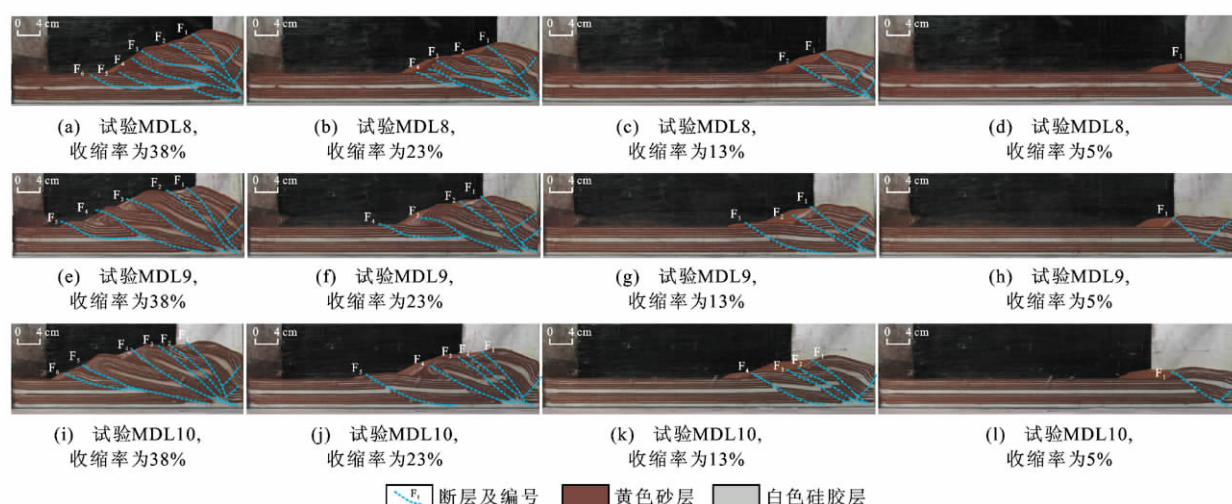


图6 挤压方向与受力边界间的夹角变化模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of Simulation Results About Different Included Angles Between Compression Direction and Stress Boundary

23%时,开始发育第1条滑脱断层 F_4 (图6中试验MDL9);当挤压方向与受力边界间的夹角为 55° 、收缩率接近38%时,开始形成第1条滑脱断层 F_6 (图6中试验MDL10)。

(2)当收缩率相同时,挤压方向与受力边界间夹角较小者的推覆体前缘水平位移较快(图6中试验MDL10)。

(3)当收缩率相同时,挤压方向与受力边界间夹角较大者的推覆体前缘垂向位移量相对较大(图6中试验MDL8)。

2.4 滑脱层黏度

在上覆砂层厚度、受力边界条件、上部滑脱层厚度和黏度($5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)保持不变的前提下,改变下部滑脱层黏度,模拟试验结果具有如下特点。

(1)当滑脱层黏度为 $0.5 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时(图7中

试验MDL11),分层变形特征比较明显,上部滑脱层发育前展型叠瓦式逆冲断层及其相关褶皱,背斜倒转,向斜平缓,断层底部收敛于上部滑脱层。下部滑脱层先发育1条反向断层,然后依次发育3条同向逆冲断层。

(2)当滑脱层黏度增大到 $1.0 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时(图7中试验MDL12),在收缩率小于25%时,上、下部滑脱层分层变形特征明显,当收缩率接近37.5%时,上、下部滑脱层同时变形,形成断层 F_{12} 。然后随着挤压量的增加,变形主要发生在上部滑脱层。总体变形特征表现为上部滑脱层发育断层及其相关倒转背斜构造,而向斜构造不发育。

(3)当滑脱层黏度为 $2.0 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时(图7中试验MDL13),在收缩率小于12.5%时,上、下部滑脱层同时变形,先形成断层 F_1 ;当收缩率为25%时,

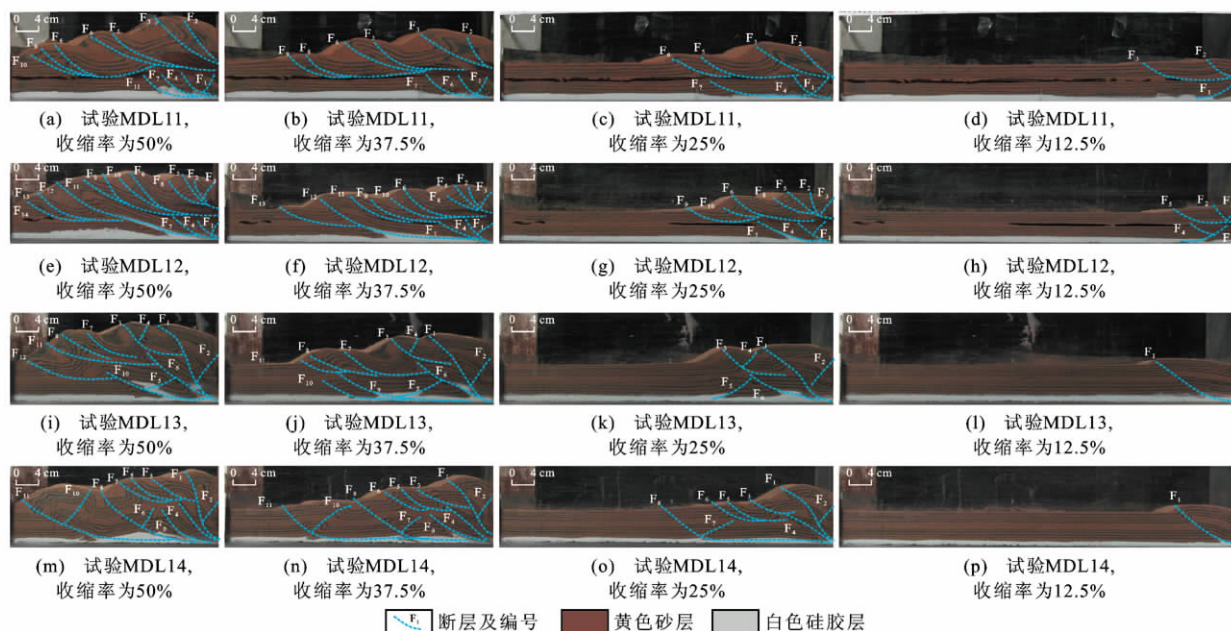


图7 下部滑脱层黏度变化模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of Simulation Results About Different Viscosities of Lower Decollement

在 F_1 后侧形成反冲断层 F_2 , 在 F_1 前侧上部滑脱层先形成滑脱褶皱, 再发育断层 F_3 、 F_4 ; 在下部滑脱层先发育反向断层 F_5 , 后发育断层 F_6 , 两者组成对冲三角带构造。随着挤压量的增加, 上、下部滑脱层开始分层变形, 上部滑脱层发育前展型滑脱断层及其相关褶皱。

(4) 当滑脱层黏度为 $2.5 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时(图7中试验 MDL14), 收缩率为 12.5% 以前的变形特征同试验 MDL13。在收缩率大于 12.5% 以后, 随着挤压量的增大, 在 F_1 后侧形成反冲断层 F_2 , 在 F_1 前侧上部滑脱层形成 3 条叠瓦式断层, 在下部滑脱层形成断层 F_4 。当收缩率为 25% 时, 下部滑脱层发育断层 F_7 及切割上、下部滑脱层的断层 F_8 , 两者间构成背冲构造。当收缩率为 37.5% 时, 在 F_8 前侧发育断层 F_{10} 、 F_{11} , 组成第 2 个背冲构造, F_8 与 F_{10} 组成对冲构造。当收缩率为 50% 时, 断层 F_8 、 F_{11} 位移量增大, 变为主控滑脱断层。

3 讨论

地震剖面 and 钻井资料显示, 准噶尔盆地南缘西段霍尔果斯—安集海背斜带具有分层滑脱、背冲构造发育的变形特点, 与高黏度(黏度大于 $2.0 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) 双滑脱层试验结果(图7中试验 MDL13、MDL14)具有类似之处。前人多年来的解释方案认为霍尔果斯背斜上部滑脱断层 F_2 具有双向逆冲特点, 下部滑脱断层 F_6 上盘发育两条反冲断

层[图8(a)], 同时认为安集海背斜是下部滑脱断层及其反冲断层构成的背冲构造[4, 25-28]。本文的解释方案认为上部滑脱断层 F_2 具有单向逆冲特点, 安集海背斜是上部滑脱断层及其反冲断层构成的背冲构造[图8(b)]。为了证实霍尔果斯—安集海背斜带解释的合理性, 借鉴高黏度滑脱层试验结果, 结合地震剖面地层组合特点和边界条件, 设计斜向挤压和高黏度双滑脱层物理模型进行验证。

试验模型规格为 $60 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。试验装置右侧为固定挡板, 左侧为带有马达的活动端, 活动端前侧放置一个三角形聚苯板模型, 使挤压方向与受力边界间的夹角为 75° 。根据剖面地层厚度按比例铺设 8 层材料, 自下而上厚度分别为 1.2、0.8、1.0、1.2、0.8、0.8、1.0、1.0 cm, 分别代表 C、T、J、K、E、 N^1 、 N^{21} 、 N^{22} 地层单位, 其中, J 层和 E 层材料为硅胶(黏度为 $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$), 代表煤层和泥岩层, 其他层的材料为松散石英砂。马达挤压速率为 $0.03 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

当收缩率为 33% 时, 模拟结果[图8(c)]中的断层 F_5 、 $F_{11} \sim F_{13}$ 分别与本文解释方案中的断层 $F_2 \sim F_4$ 、 F_7 相对应, 显示为前展型分层滑脱变形组合, 与前人解释方案具有较大差异。说明斜向挤压边界与侏罗纪煤层、古近纪泥岩层的分层滑脱作用是形成霍尔果斯—安集海褶皱—冲断带的主要因素。

4 结语

(1) 以微玻璃珠作滑脱层产生前展型逆冲叠瓦式

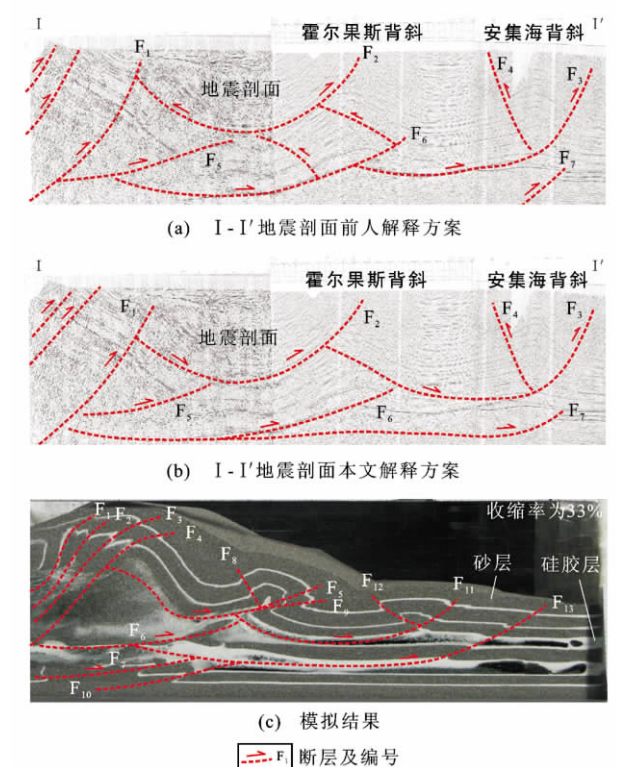


图8 模拟结果与霍尔果斯—安集海背斜带地震剖面不同解释方案对比

Fig. 8 Comparison of Simulation Result with Different Versions of Seismic Profile Interpretation in Khorghos-Anjihai Anticlinal Zone

断裂构造,下部滑脱层起主控滑脱作用;以黏性材料硅胶作滑脱层产生冲断-褶皱构造,具有分层变形特征。

(2)以微玻璃珠为滑脱层材料时,上部滑脱层厚度以及滑脱层之上砂层厚度越大越容易形成滑脱断层;挤压方向与受力边界间夹角越大,上部滑脱层越容易先形成滑脱褶皱;当收缩率相同时,挤压方向与受力边界间的夹角较小者,其推覆体前缘水平位移较快。

(3)以硅胶为滑脱层材料时,下部滑脱层硅胶黏度为 $500\sim 1\,000\text{ Pa}\cdot\text{s}$,形成分层滑脱前展型逆冲叠瓦式构造变形;当硅胶黏度为 $2\,000\sim 2\,500\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,靠近挤压端先形成基底卷入式背冲构造,然后在上部滑脱层形成叠瓦式构造、背冲式构造,在下部滑脱层形成对冲三角带构造、背冲构造、叠瓦式构造。

(4)准噶尔盆地南缘霍尔果斯—安集海褶皱-冲断带具有滑脱变形特征,斜向挤压、侏罗纪煤层与古近纪泥岩层的分层滑脱作用是控制变形过程的主要因素。

参考文献:

References:

[1] CHESTER J S, LOGAN J M, SPANG J H, et al. In-

fluence of Layering and Boundary Conditions on Fault-bend and Fault-propagation Folding[J]. GSA Bulletin, 1991, 103(9): 1059-1072.

[2] MARSHAK S, WILKERSON M S. Effect of Overburden Thickness on Thrust Belt Geometry and Development[J]. Tectonics, 1992, 11(3): 560-566.

[3] FISCHER M P, JACKSON P B. Stratigraphic Controls on Formation Patterns in Fault-related Folds: a Detachment Fold Example from the Sierra Madre Oriental, Northeast Mexico[J]. Journal of Structural Geology, 1999, 21(6): 613-633.

[4] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 乌鲁木齐山前坳陷逆断裂褶皱带及其形成机制[J]. 地质前缘, 1999, 6(4): 191-201.

DENG Qi-dong, FENG Xian-yue, ZHANG Pei-zhen, et al. Reverse Fault and Fold Zone in the Urumqi Range-front Depression of the Northern Tianshan and Its Genetic Mechanism[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(4): 191-201.

[5] 何登发, SUPPE J, 贾承造. 断层相关褶皱理论与应用研究新进展[J]. 地质前缘, 2005, 12(4): 353-364.

HE Deng-fa, SUPPE J, JIA Cheng-zao. New Advances in Theory and Application of Fault-related Folding[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 353-364.

[6] 周叶, 林舸, 龚发雄, 等. 单层褶皱变形过程中最大主应力与水平应变的变化及其影响因素[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 37-43.

ZHOU Ye, LIN Ge, GONG Fa-xiong, et al. Variation Between the Maximum Principal Stress and Horizontal Strain During Single Fold Deformation and Its Controlling Factors[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(1): 37-43.

[7] 邓洪菱, 张长厚, 李海龙, 等. 褶皱相关断裂构造及其地质意义[J]. 自然科学进展, 2009, 19(3): 285-296.

DENG Hong-ling, ZHANG Chang-hou, LI Hai-long, et al. Structure of Fold-related-fault and Its Geological Significance[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 285-296.

[8] 李忠权, 张寿庭, 应丹琳, 等. 准噶尔盆地南缘托斯台地区构造特征研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(6): 593-598.

LI Zhong-quan, ZHANG Shou-ting, YING Dan-lin, et al. The Characteristics of the Structure Section in Tuositai Region on the South Edge of Junggar Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2010, 37(6): 593-598.

[9] 宋勇, 冯建伟, 戴俊生, 等. 前陆冲断带构造应力场

- 与裂缝发育关系[J]. 地质力学学报, 2010, 16(3): 310-324.
- SONG Yong, FENG Jian-wei, DAI Jun-sheng, et al. Relationship Between Structural Stress Field and Development of Fractures in Foreland Thrust Belt[J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16(3): 310-324.
- [10] 武国利, 陈虹, 田密, 等. 大巴山弧形构造带中段渔渡地区侏罗纪叠加变形研究[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2): 130-136.
- WU Guo-li, CHEN Hong, TIAN Mi, et al. Study on Jurassic Superposed Deformation in Yudu Area Located in the Middle of Dabashan Tectonic Belt[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2010, 32(2): 130-136.
- [11] COSTA E, VENDEVILLE B C. Experimental Insights on the Geometry and Kinematics of Fold-and-thrust Belts Above Weak, Viscous Evaporitic Decollement [J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24(11): 1729-1739.
- [12] KOYI H A, VENDEVILLE B C. The Effect of Decollement Dip on Geometry and Kinematics of Model Accretionary Wedges[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(9): 1445-1450.
- [13] KOYI H A, COTTON J. Experimental Insights on the Geometry and Kinematics of Fold-and-thrust Belts Above Weak, Viscous Evaporitic Decollement; a Discussion[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(11): 2139-2141.
- [14] 汤良杰, 杨克明, 金文正, 等. 龙门山冲断带多层次滑脱带与滑脱构造变形[J]. 中国科学: D 辑, 2008, 38(增 1): 30-40.
- TANG Liang-jie, YANG Ke-ming, JIN Wen-zheng, et al. Multiple Detachment Belts and Deformation of Longmenshan Thrust Belt[J]. Science in China: Series D, 2008, 38(S1): 30-40.
- [15] 颜丹平, 金哲龙, 张维宸, 等. 川渝湘鄂薄皮构造带多层拆离滑脱系的岩石力学性质及其对构造变形样式的控制[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1687-1697.
- YAN Dan-ping, JIN Zhe-long, ZHANG Wei-chen, et al. Rock Mechanical Characteristics of the Multi-layer Detachment Fault System and Their Controls on the Structural Deformation Style of the Sichuan-Chongqing-Hunan-Hubei Thin-skinned Belt, South China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(10): 1687-1697.
- [16] 于福生, 王彦华, 李晓剑, 等. 川西坳陷孝泉—丰谷构造带变形特征及成因机制模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 45-53.
- YU Fu-sheng, WANG Yan-hua, LI Xiao-jian, et al. Deformation Characteristics and Genetic Simulation of Xiaquan-Fenggu Structural Belt in West Sichuan Depression[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 45-53.
- [17] DAVIS D M, ENGELDER T. The Role of Salt in Fold-and-thrust Belts [J]. Tectonophysics, 1985, 119(1/2): 67-88.
- [18] GUTSCHER M A, KUKOWSKI N, MALAVIELLE J, et al. Cyclical Behavior of Thrust Wedges; Insights from High Basal Friction Sandbox Experiments[J]. Geology, 1996, 24(2): 135-138.
- [19] COTTON J T, KOYI H A. Modeling of Thrust Fronts Above Ductile and Frictional Detachments; Application to Structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan[J]. GSA Bulletin, 2000, 112(3): 351-363.
- [20] SCHARER K M, BURBANK D W, CHEN J, et al. Detachment Folding in the Southwestern Tianshan-Tarim Foreland, China: Shortening Estimates and Rates [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(11): 2119-2137.
- [21] 周建勋, 郎建, 刘重庆. 韧性基底黏度对褶皱-冲断带变形特征的影响——来自物理模拟的启示[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2009, 39(3): 392-398.
- ZHOU Jian-xun, LANG Jian, LIU Chong-qing. Influence of Viscosity of Ductile Substrate on Deformational Features of Fold-thrust Belts—Insights from Physical Modeling[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2009, 39(3): 392-398.
- [22] 于福生, 李国志, 杨光达, 等. 准噶尔盆地南缘褶皱-冲断带变形特征及成因机制模拟[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 386-395.
- YU Fu-sheng, LI Guo-zhi, YANG Guang-da, et al. Deformation Feature and Genesis Simulation of Fold-and-thrust Belts in the Southern Margin, Junggar Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(3): 386-395.
- [23] MASSOLI D, KOYI H A, BARCHI M R. Structural Evolution of a Fold and Thrust Belt Generated by Multiple Decollements; Analogue Models and Natural Examples from the Northern Apennines (Italy) [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(2): 185-199.
- [24] LETURMY P, MUGNIER J L, VINOUR P, et al. Piggyback Basin Development Above a Thin-skinned Thrust Belt with Two Detachment Levels as a Function of Interactions Between Tectonics and Superficial Mass Transfer: the Case of the Subandean Zone

- (Bolivia)[J]. *Tectonophysics*, 2000, 320(1): 45-67.
- [25] SHERKATI S, MOLINARO M, LAMOTTE D F, et al. Detachment Folding in the Central and Eastern Zagros Fold-belt (Iran): Salt Mobility, Multiple Detachments and Late Basement Control[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(9): 1680-1696.
- [26] 刘玉萍,尹宏伟,张洁,等. 褶皱-冲断体系双层滑脱构造变形物理模拟实验[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(4): 424-428.
- LIU Yu-ping, YIN Hong-wei, ZHANG Jie, et al. Physical Modeling on Double Decollements Structure in Fold-and-thrust Belt[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2008, 30(4): 424-428.
- [27] 于福生,张芳峰,杨长清,等. 龙门山前缘关口断裂典型构造剖面的物理模拟实验及其变形主控因素研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(2): 147-158.
- YU Fu-sheng, ZHANG Fang-feng, YANG Chang-qing, et al. Physical Simulation and Major Deformation Controlling Factors of Typical Structural Sections for Guankou Fault in the Front of Longmen Mountains[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(2): 147-158.
- [28] HUBBERT M K. Theory of Scale Models as Applied to the Study of Geologic Structures[J]. *GSA Bulletin*, 1937, 48(10): 1459-1519.
- [29] 刘和甫,梁慧社,蔡立国,等. 天山两侧前陆冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. *地球科学*, 1994, 19(6): 727-741.
- LIU He-fu, LIANG Hui-she, CAI Li-guo, et al. Evolution and Structural Style of Tianshan and Adjacent Basins, Northwestern China[J]. *Earth Science*, 1994, 19(6): 727-741.
- [30] 汪新伟,汪新文,刘剑平,等. 准噶尔盆地南缘褶皱-逆冲断层带分析[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 411-421.
- WANG Xin-wei, WANG Xin-wen, LIU Jian-ping, et al. Analysis of the Fold-thrust Zone in the Southern Junggar Basin, North-western China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 411-421.
- [31] 李忠权,陈更生,张寿庭,等. 准噶尔盆地南缘吐谷鲁、安集海构造剖面平衡地质检验[J]. *成都理工学院学报*, 2000, 27(4): 348-351.
- LI Zhong-quan, CHEN Geng-sheng, ZHANG Shou-ting, et al. Balancing Check of Tugulu and Anjihai Structures in Southern Junggar Basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2000, 27(4): 348-351.
- [32] 陈书平,漆家福,于福生,等. 准噶尔盆地南缘构造变形特征及其主控因素[J]. *地质学报*, 2007, 81(2): 151-157.
- CHEN Shu-ping, QI Jia-fu, YU Fu-sheng, et al. Deformation Characteristics in the Southern Margin of the Junggar Basin and Their Controlling Factors[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 151-157.
- [33] KRANTZ R W. Measurements of Friction Coefficients and Cohesion for Faulting and Fault Reactivation in Laboratory Models Using Sand and Sand Mixtures[J]. *Tectonophysics*, 1991, 188(1/2): 203-207.
- [34] PANIEN M, SCHREURS G, PFIFFNER A. Mechanical Behaviour of Granular Materials Used in Analogue Modeling: Insights from Grain Characterisation, Ring-shear Tests and Analogue Experiments[J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(9): 1710-1724.
- [35] SCHELLART W P. Shear Test Results for Cohesion and Friction Coefficients for Different Granular Materials: Scaling Implications for Their Usage in Analogue Modeling[J]. *Tectonophysics*, 2000, 324(1/2): 1-16.
- [36] WEIJERMARS R. Flow Behavior and Physical Chemistry of Bouncing Putties and Related Polymers in View of Tectonic Laboratory Applications[J]. *Tectonophysics*, 1986, 124(3/4): 325-358.
- [37] WEIJERMARS R, JACKSON M P A, VENDEVILLE B. Rheological and Tectonic Modeling of Salt Provinces[J]. *Tectonophysics*, 1993, 217(1/2): 143-174.